

ANNÉE 1925

THÈSE

POUR

320

LE DOCTORAT EN MÉDECINE (DIPLOME D'ÉTAT)

PRÉSENTÉE PAR

EDOUARD LA BURTHE

Né le 15 Février 1889, à La Rochelle (Charente-Inférieure)

L'INVESTIGATION TRIODIQUE DES PHÉNOMÈNES ÉLECTRIQUES Accompagnant la Contraction Musculaire Est-elle Possible ?...

Essai d'un moyen nouveau
de

Captation, de Découpage et d'Amplification des Courants électriques
accompagnant la contractation musculaire, en général,
et celle du Myocarde, en particulier,
par le moyen de la Lampe Triode (lampe à trois électrodes)

Président : M. BRINDEAU, Professeur

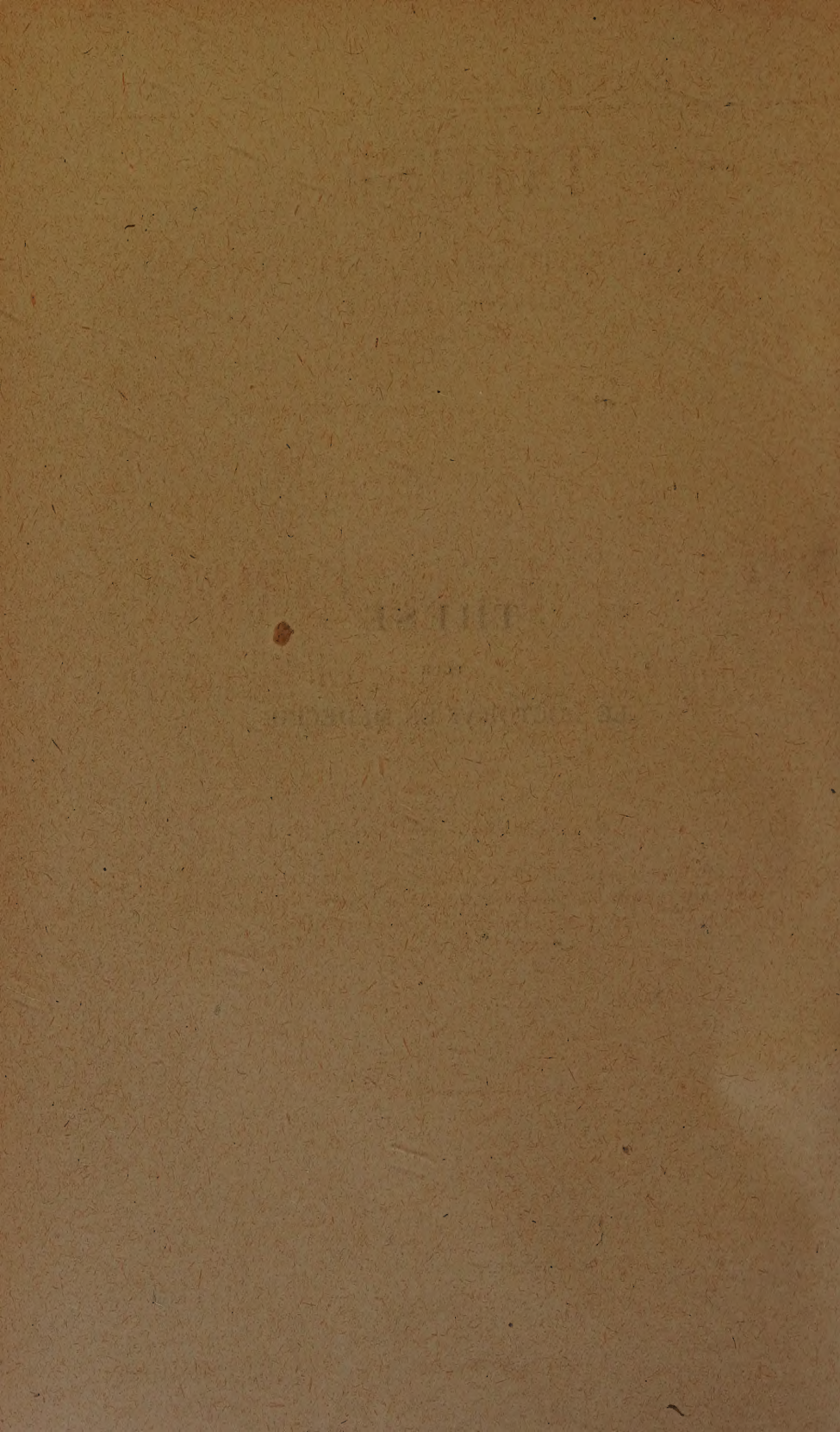
PARIS

AMÉDÉE LEGRAND, ÉDITEUR

93, BOULEVARD SAINT-GERMAIN, 93

1925

THÈSE
POUR
LE DOCTORAT EN MÉDECINE



ANNÉE 1925

THÈSE

No.

POUR

LE DOCTORAT EN MÉDECINE
(DIPLOME D'ÉTAT)

PRÉSENTÉE PAR

EDOUARD LA BURTHER

Né le 15 Février 1889, à La Rochelle (Charente-Inférieure)

L'INVESTIGATION TRIODIQUE
DES
PHÉNOMÈNES ÉLECTRIQUES
Accompagnant la Contraction Musculaire
Est-elle Possible ?...

Essai d'un moyen nouveau
de

Captation, de Découpage et d'Amplification des Courants électriques
accompagnant la contraction musculaire, en général,
et celle du Myocarde, en particulier,
par le moyen de la Lampe Triode (lampe à trois électrodes)

Président : M. BRINDEAU, Professeur

PARIS

AMÉDÉE LEGRAND, ÉDITEUR

93, BOULEVARD SAINT-GERMAIN, 93

1925

I. — PROFESSEURS

MM.

Anatomie.	NICOLAS
Anatomie médico-chirurgicale.	CUNÉO.
Physiologie.	Ch. RICHEL.
Physique médicale.	André BROCA.
Chimie organique et chimie générale.	DESGREZ.
Bactériologie.	BEZANÇON.
Parasitologie et histoire naturelle médicale.	BRUMPT.
Pathologie et thérapeutique générales.	Marcel LABBÉ.
Pathologie médicale.	SICARD.
Pathologie chirurgicale.	LECÈNE.
Anatomie pathologique.	LETULLE.
Histologie.	PRENANT.
Pharmacologie et matière médicale.	RICHAUD.
Thérapeutique.	CARNOT.
Hygiène.	Léon BERNARD.
Médecine légale.	BALTHAZARD.
Histoire de la médecine et de la chirurgie.	MÉNÉTRIÉR.
Pathologie expérimentale et comparée.	ROGER.
Clinique médicale.	GILBERT.
	CHAUFFARD.
	ACHARD.
	WIDAL.
	MARFAN.
	NOBÉCOURT.
Hygiène et clinique de la première enfance.	H. CLAUDE.
Clinique des maladies des enfants.	JEANSELME.
Clinique des maladies mentales et des maladies de l'encéphale.	GUILLAIN.
Clinique des maladies cutanées et syphilitiques.	TEISSIER.
Clinique des maladies du système nerveux.	DELBET.
Clinique des maladies infectieuses.	HARTMANN.
Clinique chirurgicale.	LEJARS.
	GOSSET.
Clinique ophtalmologique.	De LAPERSONNE
Clinique urologique.	LEGUEU.
	COUVELAIRE.
Clinique d'accouchements.	BRINDEAU.
	JEANNIN.
Clinique gynécologique.	J -L FAURE.
Clinique chirurgicale infantile et orthopédie.	BROCA Auguste.
Clinique thérapeutique médicale.	VAQUEZ.
Clinique oto-rhino-laryngologique.	SEBILEAU.
Clinique thérapeutique chirurgicale.	DUVAL.
Clinique propédeutique.	SERGENT.



II. — AGRÉGÉS EN EXERCICE

MM.		MM.	
ABRAMI	Pathologie médicale	LABBÉ (Henri) . . .	Chimie biologique.
ALGLAVE	Pathologie chirurgi- cale.	LARDENNOIS . . .	Pathologie chirurgi- cale.
AUBERTIN	Pathologie médicale.	LE LORIER	Obstétrique.
BASSET	Pathologie chirurgi- cale.	LEMAITRE	Oto-rhino-laryngolo- gie.
BAUDOUIN	Pathologie médicale.	LEMIERRE	Pathologie médicale.
BINET	Physiologie.	LÉVY-SOLAL	Obstétrique.
BLANCHETIERE . . .	Chimie biologique.	LHERMITTE	Pathologie mentale.
BRANCA	Histologie.	LIAN	Pathologie médicale.
BRULÉ	Pathologie médicale.	MATHIEU	Pathologie chirurgi- cale.
BUSQUET	Pharmacologie et ma- tière médicale.	METZGER	Obstétrique.
CADENAT	Pathologie chirurgi- cale.	MOCQUOT	Pathologie chirurgi- cale.
CHAMPY	Histologie.	MONDOR	Pathologie chirurgi- cale.
CHIRAY	Pathologie médicale.	MOURE	Pathologie chirurgi- cale.
CLERC	Pathologie médicale.	MULON	Histologie.
DEBRÉ	Hygiène.	PHILIBERT	Bactériologie.
I. de JONG	Anatomie pathologi- que.	RIBIERRE	Pathologie médicale.
DUVOIR	Médecine légale.	RICHET Fils	Physiologie.
ÉCALLE	Obstétrique.	ROUVIÈRE	Anatomie.
FIESSINGER	Pathologie médicale.	STROHL	Physique médicale.
FOIX	Pathologie médicale.	TANON	Pathologie médicale.
GARNIER	Pathologie expéri- mentale.	TIFFENEAU	Pharmacologie et ma- tière médicale.
HARVIER	Pathologie médicale.	VAUDESCAL	Obstétrique.
HEITZ-BOYER . . .	Urologie.	VERNE	Histologie.
HOVELACQUE . . .	Anatomie.	VILLARET	Pathologie médicale.
JOYEUX	Parasitologie.	WELTER	Ophthalmologie.

III. — AGRÉGÉS RAPPELÉS A L'EXERCICE

pour le service des examens

MM.		MM.	
CAMUS	Physiologie.	RETTÉTERER	Histologie.
GOUGEROT	Pathologie médicale.	ROUSSY	Anatomie pathologi- que.
GUÉNIOT	Obstétrique.		

IV. — AGRÉGÉS CHARGÉS DE COURS DE CLINIQUE

à titre permanent

MM.		MM.	
AUVRAY.	Clinique chirurgicale.	OMBRÉDANNE. .	Clinique chirurgicale infantile.
CHEVASSU.	Clinique chirurgicale.	PROUST.	Clinique chirurgicale
LAIGEL-LAVASTINE. .	Clinique médicale.	RATHERY.	Clinique médicale.
LEREBGUILLET. .	Clinique médicale infantile.	SCHWARTZ. . . .	Clinique chirurgicale.
LÉRI.	Clinique médicale.	TERRIEN.	Clinique ophtalmologique.
LEPER.	Clinique médicale.		

V. — CHARGÉS DE COURS

MM. MAUCLAIRE, agrégé.	}	Chargé du cours de chirurgie orthopédique chez l'adulte pour les accidentés du travail, les mutilés de guerre et les infirmes adultes.
FREY.		Stomatologie.
N.		Éducation physique.
LEDOUX-LEBARD.		Radiologie clinique.

Par délibération en date du 9 Décembre 1798, l'Ecole a arrêté que les opinions émises dans les dissertations qui lui seront présentées, doivent être considérées comme propres à leurs auteurs et qu'elle n'entend leur donner aucune approbation ni improbation.

A MON FILS

A MA FEMME

A MES PARENTS

A MON MAITRE
M. LE PROFESSEUR MARFAN

A M. LE PROFESSEUR AUG. VAUDESCAL

AU DOCTEUR LANTUÉJOUL
CHEF DE CLINIQUE A TARNIER

A MES MAITRES ET CAMARADES DE LA MARINE

A MON MAITRE ET PRÉSIDENT DE THÈSE

M. LE PROFESSEUR BRINDEAU

PROFESSEUR A LA FACULTÉ DE MÉDECINE DE PARIS

OFFICIER DE LA LÉGION D'HONNEUR

Qui a bien voulu accepter la présidence de cette thèse après nous avoir donné son encouragement à poursuivre la réalisation et l'étude de cette méthode nouvelle d'investigation des phénomènes électriques accompagnant la contraction musculaire.

En témoignage de notre admiration pour son précieux et fécond enseignement ; de notre profonde et affectueuse gratitude, pour toutes les marques de sympathie qu'il n'a cessé de nous montrer après nous avoir accueilli, avec la plus grande bienveillance, et nous avoir fait l'honneur de nous confier la fonction de Moniteur à la Clinique Tarnier, pendant les années 1923-1924-1925.

En 1848, Dubois-Raymond enseigne que toute contraction musculaire s'accompagne de phénomènes électriques.

A la suite de ses travaux puis de ceux de Matteucci, Engelmann; Marey, Kolliker, Muller et Waller... utilisant, dans leurs recherches, l'électromètre capillaire de Lipmann, sensible aux plus faibles variations de potentiel, il pouvait être formulé la loi physiologique suivante :

« Toute partie d'organe — qui se meut, se contracte, ou est excitée par rapport à une partie au repos de ce même organe — ne se trouve pas au même potentiel électrique. Le potentiel de la partie active est inférieur à celui de la partie passive ».

En d'autres termes, si, — aux extrémités d'un muscle à fibres parallèles, — il est appliqué deux électrodes impolarisables fermant le circuit sur un galvanomètre sensible, ce dernier, lorsqu'une excitation quelconque vient faire contracter ce muscle, traduit, par son oscillation, le passage d'un courant. Le sens de ce courant est tel qu'il se dirige de l'électrode placée au voisinage de la partie passive de l'organe, vers celle qui est appliquée le plus près possible de la partie active du même organe ; cette dernière partie est donc électronégative — c'est-à-dire à un potentiel inférieur — par rapport à la première.

Il est aisé de concevoir, — cette loi étant connue, — que, si, après les avoir préalablement décelés à l'aide d'instruments suffisamment sensibles, on parvient à obtenir, par un moyen convenable, un enregistrement des courants électriques prenant naissance dans les conditions ci-dessus indiquées, les renseignements les plus précieux peuvent être obtenus sur le fonctionnement intimes des organes.

De ces considérations — qui permettent l'étude de toute contraction musculaire — est née une méthode remarquable d'investigation de la contraction du myocarde et cette méthode a reçu le nom « d'électrocardiographie ».

Lorsque, en 1903, le professeur hollandais Einthoven, de l'Université de Leyde, eut inventé son galvanomètre à corde, cette méthode a pris aussitôt une valeur pratique considérable pour l'étude physiologique et pathologique de cet organe. Depuis lors, chaque année plus nombreux ont été les travaux des physiologistes et des cliniciens de tous les pays sur les applications diverses de cette méthode et nous ne nous attarderons pas à faire ici la nomenclature de tous ces travaux.

Très rapidement, nous allons rappeler le dispositif de l'appareil, conçu et décrit par le professeur Einthoven, dans ses parties constitutives et indiquer son fonctionnement.

Ainsi que son nom l'indique, la partie essentielle de ce galvanomètre consiste en une corde ou fibre. Cette

corde conductrice est extrêmement fine (2 à 3/1000^e de m/m), sa matière est de quartz argenté ou de platine. Elle se trouve suspendue et convenablement tendue dans un champ électromagnétique puissant — (17.000 gauss). Lorsque cette corde se trouve parcourue par un courant, si faible soit-il, — tels ceux qui prennent naissance durant la contraction du myocarde, — cette corde est impressionnée ; elle vibre et cette vibration répond avec la plus grande précision aux variations de potentiel électriques complexes qui existent entre les parties alternativement actives et passives du myocarde, durant le phénomène de la contraction cardiaque.

Il va de soi que ces mouvements de la corde sont d'amplitude très réduite, de telle sorte qu'il est nécessaire d'utiliser un microscope judicieusement disposé de manière à amplifier ces vibrations afin de pouvoir les enregistrer convenablement.

Avec les vitesses et les grossissements exigés par les investigations cardiographiques, il convient d'éclairer très fortement la corde, on le fait soit à l'aide d'une lampe à arc, soit à l'aide de toute autre source lumineuse suffisamment intense. Le pinceau lumineux est concentré par des condensateurs puis il traverse une cuve d'eau destinée à protéger la partie optique et à empêcher l'échauffement de la corde. Il vient, ensuite, frapper la corde qui intercepte une ombre dans son faisceau.

Sous l'influence du courant électrique cardiaque, la corde se met à vibrer entre les pôles de l'électroaimant et l'ombre de cette corde se déplace dans un plan vertical. La projection de cette ombre vibrante, dûment amplifiée

par son passage au travers du microscope, vient frapper une plaque sensible se déplaçant d'un mouvement cinématographique...

Le phénomène s'inscrit, de cette façon, sur un film, et le tracé obtenu donne l'enregistrement exact des variations de potentiel que présentent, à chaque instant, les parties actives du muscle cardiaque par rapport aux parties au repos. Ce tracé se nomme un « électrocardiogramme ».

Waller, dans ses remarquables recherches, a reconnu que les courants, qui accompagnent les systoles cardiaques, se propagent à la surface du corps humain en suivant des lignes équipotentiellles disposées symétriquement de part et d'autre d'une ligne de potentiel : zéro, qu'il dénomma : ligne iso-électrique. Cette ligne iso-électrique est perpendiculaire à la ligne d'axe électrique, c'est-à-dire à l'axe anatomique du cœur, unissant le milieu de la base à la pointe de l'organe, à égale distance de ces deux points qui sont les deux pôles électriques du cœur.

Par suite, pour étudier les courants cardiaques, il suffit de prendre des connexions sur les membres de part et d'autre de cette ligne iso-électrique et l'on a reconnu qu'il suffisait, en pratique, d'utiliser les dérivations suivantes pour obtenir les meilleurs tracés électrocardiographiques.

Dérivation I : D. I. — Main gauche, main droite.

Cette dérivation constitue une dérivation transversale.

On la réalise en amenant l'électrode appliquée à la main gauche, à l'extrémité inférieure de la corde, tandis que la connexion de la main droite se fait à l'extrémité supérieure de la corde.

Dérivation II : D. II. — Main droite, pied gauche.

Cette dérivation est oblique. La main droite est connectée à l'extrémité inférieure de la corde, le pied gauche à son extrémité supérieure.

Dérivation III : D. III. — Main gauche, pied gauche.

Cette dérivation est longitudinale. On connecte la main gauche à l'extrémité inférieure de la corde et le pied gauche à son extrémité supérieure.

Ces différentes dérivations doivent se réaliser au moyen d'électrodes non polarisables ; sans cela, on obtiendrait des graphiques déformés.

Enfin, on a reconnu, qu'en dehors des courants variables, dont il vient d'être parlé — et qui dépendent expressément des variations de potentiels se produisant entre les parties actives et passives du myocarde se contractant, — il existe un autre courant, relativement fort et constant, que l'on a dénommé : courant de peau ou de repos et que l'on attribue au fonctionnement des glandes de l'organisme. Il est donc nécessaire de soustraire le galvanomètre d'Einthoven à l'action de ce courant. Pour ce faire, on le compense, avec la plus grande précision, en intercalant dans le circuit une différence de potentiel égale et de signe contraire (Suivre sur la fig. 1).

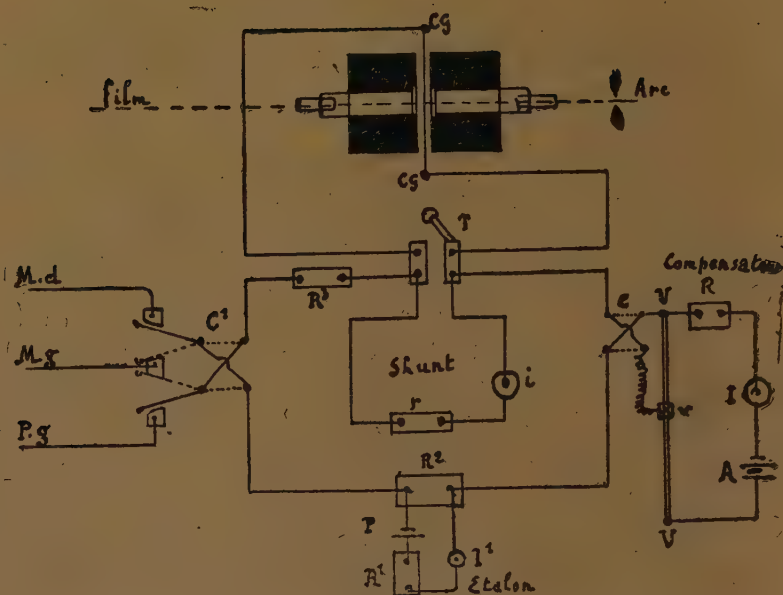


FIG. 1

Le circuit compensateur consiste en une source électrique, accumulateur ou élément de pile (A), un interrupteur (I), une résistance fixe (R de 19 ohms), une résistance variable (V.V. de 1 ohm). Ce dispositif, placé dans le circuit de connexion reliant le sujet en expérience au galvanomètre, sert à ramener l'image de la corde au zéro lorsque la connexion est faite au galvanomètre ; et cela, par la manipulation de la résistance variable (V.V.). Dans ce circuit on place, généralement, un commutateur

(C), de façon à pouvoir au besoin renverser le courant de la source électrique (A).

Un dernier circuit — circuit étalon — est placé, également, dans le circuit de connexion. Son rôle est de permettre de balancer dans le circuit principal un courant de 3 millivolts destiné à étalonner les déplacements de la corde afin que les différents électrocardiogrammes puissent être comparés entre eux. Ce circuit étalon est constitué par un élément de pile normal (P), des résistances fixes (R 1 et R 2) et un interrupteur (I 1).

Les connexions du sujet au galvanomètre se font ainsi :

La corde du galvanomètre (CG. CG.), est unie à un interrupteur (T), qui sert à fermer le circuit de la corde de façon à la mettre au repos et à l'abri des accidents. Cet interrupteur est, en outre, en rapport avec deux circuits.

L'un de ces circuits est un shunt comprenant une résistance (r) et un interrupteur (i), disposés de telle façon que lorsque ce circuit est fermé, la plus grande partie du courant étudié passe par le shunt. Par cet artifice, la corde est ainsi protégée contre des variations trop fortes de potentiel, dans le cas où l'on serait amené à faire passer dans le galvanomètre des courants de force électromotrice inconnue.

Le second de ces circuits est le circuit principal, interrompu en trois points :

- 1° En (T), où il arrive au circuit de la corde ;
- 2° En (C 1), où se place un commutateur à deux directions, qui met le circuit principal en communication avec le sujet considéré ;
- 3° En (C), où il existe un autre commutateur le mettant en rapport avec le circuit de compensation.

Ceci dit, pour prendre un électrocardiogramme, on opère de la façon suivante :

- 1° Le circuit compensateur et le circuit étalon étant ouverts), le shunt (i) est fermé, le sujet mis en circuit sur la dérivation : D I (main droite, main gauche). (T) est ouvert ; aussitôt, l'ombre de la corde dévie, elle prend une position différente de celle qu'elle occupait dans sa position de repos. Cette déviation répond au courant de repos, passant dans le galvanomètre. La corde est également animée de légers battements traduisant le passage de petits électrocardiogrammes.

- 2° On ferme l'interrupteur (I), un courant compensateur traverse alors le circuit principal, il neutralise le courant de peau et par la manœuvre de la résistance variable (V.V.), on ramène au zéro l'ombre de la corde ;

- 3° Le shunt (i), est ouvert et la corde vibre de nouveau, ces oscillations sont beaucoup plus considérables, car tout le courant passe alors dans le galvanomètre ;

- 4° Si l'image de la corde se déplace trop dans un sens, on la ramène au zéro au moyen de la résistance variable du compensateur ;

5° On règle, enfin, la tension de la corde en lançant, à l'aide de l'interrupteur du circuit étalon, brusquement un courant de 3 millivolts dans la corde. La courbe se trouve alors transportée à 3 centimètres. Pour réduire sa sensibilité on tend la corde, en agissant sur un bouton moleté prévu pour cet effet ; pour augmenter la sensibilité, on détendrait la corde ;

6° Le tracé, pris dans la dérivation : D I₁, on répète les manœuvres dans les dérivations D-II et D-III. Les courbes obtenues ont l'amplitude convenable, lorsque une force électromotrice de 3 millivolts (circuit étalon), déplace de 3 centimètres l'image de la corde.

Sans entrer dans le détail de sa discussion, nous dirons que la courbe obtenue, grâce à cet instrument, affecte une allure absolument caractéristique qui permet de formuler les conclusions certaines suivantes :

« Malgré les quelques dissemblances de détail que peuvent présenter les électrocardiogramme, pris chez des individus différents, ces courbes présentent, cependant, entre elles, dans chaque dérivation, une fixité de forme qui donne au clinicien la possibilité d'apprécier exactement la valeur fonctionnelle d'un cœur observé et d'apprendre, par expérience, les limites des variations compatibles avec le bon état général de l'organe.

» Si l'on prend, chez le même individu, des électrocardiogrammes à quelques temps d'intervalle, les tracés restent identiques en forme et en amplitude tant que l'organe fonctionne normalement.

» Si l'électrocardiogramme d'un sujet s'écarte nette-

ment de la courbe caractéristique, on est en droit de songer à une lésion organique.

» L'âge détermine, généralement, une modification du tracé portant surtout sur l'amplitude qui est d'autant plus faible que le sujet est plus âgé.

» Le déplacement de l'organe change, d'une façon certaine, la forme du tracé, et, par exemple, une courbe inversée doit faire, immédiatement, songer à une inversion de l'organe... »

En un mot, avec son galvanomètre, Einthoven avait placé entre les mains des physiologistes et des cliniciens un moyen nouveau, qui venait s'ajouter aux méthodes précédemment acquises et ce moyen devait permettre d'obtenir des résultats particulièrement féconds. Sans doute, auparavant, les modes d'exploration, auxquels les avaient initiés Laënnec et Corvisart donnaient-ils aux expérimentateurs le moyen de reconnaître certains délabrements du muscle cardiaque, mais il n'en laissaient pas moins dans l'ombre leur nature exacte et leurs conséquences fonctionnelles. Indispensables en tant que moyen de diagnostic, les renseignements physiologiques que pouvaient fournir ces modes d'investigation étaient nettement insuffisants.

Aussi, lorsqu'ils eurent à leur disposition une telle arme, cliniciens et physiologistes eurent tôt fait de déceler et d'enregistrer exactement les actes complexes et rapides, qui constituent la révolution cardiaque, de multiplier leurs observations en tous sens afin de pouvoir pénétrer et analyser la nature et la cause des troubles

de ces contractions, en se basant sur des documents purement objectifs.

Mais puisque telle est la valeur de cet appareil, puisque les résultats qu'il permet d'obtenir sont véritablement supérieurs — et sans contestation — à tous ceux que peuvent fournir tous les autres modes d'exploration connus, pourquoi faut-il que l'électrocardiographe d'Einthoven soit, cependant, demeuré l'outil du petit nombre, celui de rares privilégiés disposant de laboratoires richement outillés, et parfaitement agencés ; en un mot : qu'il soit un instrument de luxe ?

La raison en est simple. La description, que nous venons d'en faire, quoique rapide, nous a permis de passer en revue le nombre divers des éléments nécessaires à son établissement. L'ensemble en est complexe, délicat, encombrant et... coûteux. D'autre part, sans être vraiment très difficile, le maniement de cet appareil exige, cependant, de la part de l'expérimentateur un entraînement assez sérieux. Enfin, et surtout, la dépense répondant à son amortissement et à son utilisation ne permet pas au praticien ordinaire de lui donner place dans son cabinet de consultation.

C'est pourquoi il est arrivé que, poursuivant un jour le projet d'étudier, à l'aide de l'électrocardiographe, le tracé du cardiogramme du cœur foetal afin de le confronter avec celui du cœur maternel dans le but de rechercher un rapport hypothétique et différent de ces deux électrocardiogrammes suivant le sexe du fœtus : ce qui nous aurait permis d'établir, par ce moyen, une détec-

mination du sexe *in utero* ; rapidement, nous nous sommes heurtés aux difficultés pratiques de la méthode d'Einthoven.

De cette défaite, nous est bientôt venue l'idée d'essayer de tourner l'obstacle et de rechercher s'il ne serait pas possible de décèler les variations de potentiel électrique de la contraction musculaire, de l'amplifier, puis, enfin, de l'enregistrer d'une manière plus pratique en usant d'un appareil qui soit, tout au moins, aussi sensible que la corde galvanométrique.

Que nous fallait-il réaliser pour cela ?

Il fallait trouver un nouveau détecteur qui réunisse toutes les qualités de la corde d'Einthoven vis-à-vis de la captation des variations de potentiel accompagnant les contractions musculaires.

Il fallait, en outre, s'il était possible, que ce nouvel élément permette d'obvier à la plupart des inconvénients du galvanomètre en usage jusqu'alors.

Chapitre qualités : il faut, tout d'abord, reconnaître que le galvanomètre d'Einthoven est extrêmement sensible, puisqu'il répond à des courants dont les intensités se chiffrent par quelques 10^{-7} ampères et le potentiel à quelques millivolts.

Il est, ensuite, apériodique : ce qui veut dire qu'il ne présente pas de période d'oscillation propre et que, de ce fait, il obéit fidèlement et uniquement aux seules variations de potentiel émanant du muscle se contractant.

Enfin, son inertie est si faible que, pratiquement, on

peut la considérer comme inexistante si bien que ce galvanomètre traduit, sans hystérésis, les variations de potentiel électrique qui se produisent dans les différentes parties du myocarde, durant la contraction de ce muscle, malgré les grandes vitesses des changements de potentiel considérées.

Quant aux défauts de la corde, ils résident surtout dans sa ténuité.

Pour cette cause, la corde se trouve soumise très directement aux actions préjudiciables des changements calorifiques et hygroscopiques du milieu ambiant, aux vibrations extérieures, etc... ce qui nécessite très fréquemment un nouveau réglage.

D'autre part, il est nécessaire de recourir à la complication des divers organismes décrits, destinés à amplifier sa vibration afin de pouvoir l'enregistrer sur un film cinématographique.

Ceci posée :

Tout naturellement, notre esprit s'est porté vers la possibilité d'utiliser la lampe triode — ou thermoionique — qui, en radiotélégraphie et autres applications, a déjà permis de capter et d'amplifier des courants électriques de force électromotrice comparables à ceux qui s'établissent durant la contraction musculaire. Il convenait, *a priori*, de monter cette lampe en suivant les dispositifs connus permettant de déceler des courants à basse fréquence, puisque le battement cardiaque est à la cadence de 70 environ par minute.

Quelques essais rapides nous permirent de prendre espoir en la valeur de notre conception, et nous avons, alors, adressé la mention de notre première expérience à l'Institut en un pli cacheté, dont l'Académie accepta le dépôt en sa Séance du 12 janvier 1925, sous le numéro : 9.474.

Qu'est-ce donc que la lampe à trois électrodes ? De quel principe procède-t-elle ?... et que permet-elle de réaliser dans le domaine de la captation et de l'amplification des courants électriques d'intensité minime ?

C'est ce que, maintenant nous allons, aussi rapidement que possible, passer en revue.

C'est en 1910, que de Forest conçoit la valve thermionique ou triode et qu'il la décrit comme un excellent détecteur des courants radiotélégraphiques. Depuis lors, chaque jour a vu s'étendre le champ des applications scientifiques de cette invention, dont les propriétés remarquables permettent, pour l'avenir, les espoirs les plus vastes...

Son principe ?... « Un filament, porté à l'incandescence, émet des électrons : ceux-ci transportent des charges électriques vers une plaque, convenablement disposée, et établissent, ainsi, un circuit de plaque... Entre ces deux éléments, est placée une troisième électrode, appelée : grille, formée de fils métalliques parallèles et équidistants. Si l'on fait varier le potentiel de cette grille, on agit sur le courant du circuit de plaque que l'on peut, à son gré, interrompre, rétablir ou modifier... »

Entrons dans le détail : soient dans une ampoule de lampe, dont on a poussé au maximum le degré du vide, disposés un filament de tungstène (f) et une plaque métallique (p) (suivre sur fig. II). Si nous relions la plaque au pôle positif d'une source électrique quelconque (A), dont le pôle négatif est, d'autre part, connecté au filament considéré, nous établissons, de la sorte, un circuit dénommé : « circuit de plaque ». Un milliampèremètre (M), disposé dans un tel circuit, ne saurait indiquer aucun passage de courant. Cela se conçoit aisément si l'on considère qu'il existe un espace vide — formant interrupteur — entre la plaque et le filament...

Mais si nous établissons un second circuit en connectant les deux extrémités du filament aux pôles d'une seconde source électrique (B) suffisamment puissante pour porter à l'incandescence ce filament, nous constaterons alors que, tout aussitôt le filament est-il incandescent, le milliampèremètre (M) se met à dévier, accusant, ainsi, le passage d'un courant dans le circuit de plaque toujours interrompu, cependant, entre le filament et la plaque.

Que veut dire ceci ?... Ce phénomène indique, tout simplement, que l'espace libre compris entre le filament et la plaque est devenu — par le seul fait du chauffage du filament — conducteur : ce qui implique un transport de charge électrique entre les deux éléments considérés, au travers de l'espace libre les séparant.

On explique ce phénomène en admettant que le filament chauffé émet des électrons se portant vers la pla-

que et que ces derniers établissent, par leur projection incessante de l'un à l'autre, un contact électrique comblant l'espace libre qui sépare la plaque du filament.

La plaque (p), unie au pôle positif de la source (A) se trouve à un potentiel plus élevé que le filament. Par conséquent, les électrons, émis par ce dernier, doivent transporter des charges négatives entre le filament et la plaque pour fermer le circuit de plaque.

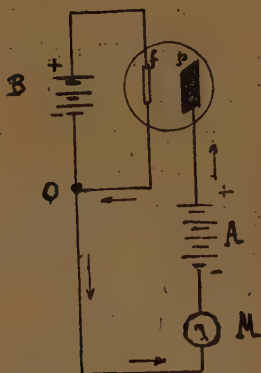


FIG. 2

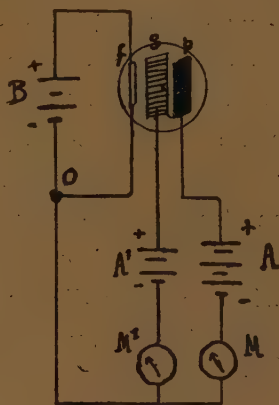


FIG. 3

Par suite on est obligé de convenir que le long du circuit de plaque, le sens du courant remonte le flux des électrons par ce fait que l'on a admis, conventionnellement, que : le sens du courant répond toujours à celui

d'un transport de charges positives et non négatives comme il se produit dans le cas présent entre le filament et la plaque, ainsi qu'il vient d'être expliqué.

Si l'on veut pousser plus loin l'étude des caractéristiques de ce circuit de plaque, on découvre que :

1° L'augmentation de la force électromotrice de la source (A) fait croître la différence de potentiel entre le filament et la plaque, et, par suite, également le courant de plaque :

2° Ce courant croît, d'abord, suivant la loi de Langmuir, proportionnellement à la puissance $3/2$ de la différence de potentiel jusqu'à ce qu'il parvienne à la limite de saturation de la plaque.

En d'autres termes, pour une faible différence de potentiel, la plaque n'absorbe pas la totalité des électrons émis par le filament.

Lorsque la différence de potentiel s'élève, la plaque absorbe une plus grosse part des électrons qui se projettent sur elle.

Puis, lorsque la différence de potentiel croît encore, la plaque finit par capter la totalité des électrons émis par le filament.

Enfin, il arrive un moment où cette différence de potentiel atteint une valeur limite pour laquelle la plaque ne saurait absorber plus d'électrons ; le courant de plaque est alors à son maximum d'intensité : « on le dénomme courant de saturation ».

3° Ce courant de saturation croît d'une façon rapide avec la température du filament ;

4° Si l'on vient à connecter en sens inverse, c'est-à-dire si l'on réunit la plaque au pôle négatif et le filament au pôle positif, on constate qu'aucun courant ne peut s'établir dans ces conditions entre le filament et la plaque ce qui veut dire : « qu'une lampe à deux électrodes ne peut pas fonctionner dans les deux sens ».

Ceci dit, il suffit, suivant la proposition de de Forest, d'adjoindre à cette lampe, entre le filament et la plaque, un cadre métallique supportant des fils tendus parallèlement entre eux et à égale distance les uns des autres — élément que l'on dénomme une « grille » — pour constituer une lampe « triode ou thermoionique » ou encore « lampe à trois électrodes, » (suivre sur la fig. III).

Unissons ce nouvel élément (g) au circuit de la plaque de l'étude précédente, en disposant, entre la grille et le point de jonction au circuit, une nouvelle source électrique (A₁) et un milliampèremètre (M₁), permettant de mesurer l'intensité du courant entre le filament et la grille au passage du courant de plaque. En changeant le sens de la polarité de la source (A₁) ou en agissant sur sa force électromotrice, on peut apporter une modification de sens ou de grandeur à la différence de potentiel entre la grille et le filament.

L'examen de la figure nous montre qu'il existe, au total, trois circuits :

1° Le circuit de chauffage du filament : o f B ;

2° Celui de plaque : o f p A M ;

3° Celui de la grille : o f A1-M1.

En O, ces trois circuits présentent un point commun. Remarquons que ce point répond au pôle négatif de la source (B) servant au chauffage du filament ; et, par suite de la chute ohmique de la tension le long du filament, ce point possède la propriété d'être au potentiel le plus bas de l'ensemble des circuits considérés.

On appelle « tension de plaque » : la différence de potentiel entre la plaque et ce point (O) ; tension de grille, celle qui existe entre la grille et ce même point (O) ».

Or, si nous amenons la grille à un potentiel inférieur à celui du point (O), par exemple, en inversant la polarité de la course (A1), il arrive, comme dans le cas de l'inversion du circuit de la plaque — (dans le cas de la lampe à deux électrodes) — que la grille repousse les électrons issus du filament, porté à l'incandescence, et si le potentiel de la grille est assez bas par rapport à celui du filament, la grille constitue, alors, un véritable écran entre le filament et la plaque : le courant de plaque est coupé au niveau de la grille.

Au fur et à mesure que l'on élève le potentiel de la grille, on la voit redevenir perméable aux électrons, émis par le filament, le courant de plaque se rétablit, le milliampèremètre (M) accuse le fait par sa déviation.

Enfin, si le potentiel de la grille devient positif par rapport à celui du filament, la grille capte bien quelques électrons pour son propre compte, mais en laisse passer le plus grand nombre, et le courant de plaque croît,

ainsi l'indique la déviation plus grande du milliampère-mètre (M).

Par conséquent, nous voyons que : « l'on peut, à volonté agir sur le courant de plaque, le couper, le rétablir, et le faire varier rien qu'en agissant sur le potentiel de la grille, interposée entre le filament et la plaque ».

D'autre part, le courant de la grille est très faible, puisque son potentiel reste au voisinage de celui du filament et qu'on le fait osciller de part et d'autre de ce dernier ; la capacité de la grille est relativement peu considérable, il en résulte que : « l'énergie d'une source électrique de minime puissance est capable de modifier son potentiel, et cette variation entraîne aussitôt une action dans un sens ou un autre dans le circuit de plaque ».

Mais quelle est la variation quantitative du courant de plaque sous l'influence de la variation de potentiel filament-grille ?

Pour l'étudier, il convient de maintenir absolument constantes les caractéristiques du courant de plaque, c'est-à-dire maintenir au même point la température du filament et la force électromotrice de la source électrique alimentant la plaque, si lors, nous faisons varier, comme il a été indiqué plus haut, le potentiel du courant de la grille depuis une valeur inférieure à celle du point (O), c'est-à-dire du filament, jusqu'à une valeur supérieure, on constate : l'interruption du courant de plaque, puis son rétablissement, puis sa progression jusqu'à un maximum, et ce maximum est atteint alors que le potentiel de la grille, supérieur à celui du filament, reste, cependant, inférieur à celui de la plaque « ce dernier res-

tant toujours supérieur à celui des deux autres électrodes ».

Si l'on observe attentivement la déviation du milliampèremètre (M_1), on constate que le courant de plaque ne passe que lorsque le potentiel de la grille, inférieur à celui du filament, atteint cependant une valeur voisine de celui-ci, puis pour une très faible augmentation de la valeur du potentiel de grille, le courant de plaque, lui, croît très rapidement. Comme les intensités du courant de grille, pour les potentiels peu élevés de la grille, sont très inférieures aux intensités correspondantes des courants de plaque, on peut dire que : de très faibles variations du potentiel du courant de grille autour d'un potentiel moyen négatif et très voisin de celui du point (O), s'accompagnent de très importantes variations du courant de plaque sans que la grille débite aucun courant.

On comprend, de ce fait, que la lampe à trois électrodes constitue un relais sans inertie, d'une grande fidélité, et d'une sensibilité telle qu'elle ne peut être égalée par aucun autre dispositif mécanique.

Une modification du potentiel de la grille détermine une variation dans la distribution des lignes de force électrique qui, issues de la plaque, dont le potentiel est le plus élevé, se portent vers la grille, vers le filament ou son atmosphère d'électrons négatifs et les dessins schématiques de la figure IV donnent une représentation assez compréhensible des accidents que la variation du potentiel de la grille fait subir aux lignes de force entre la plaque et le filament.

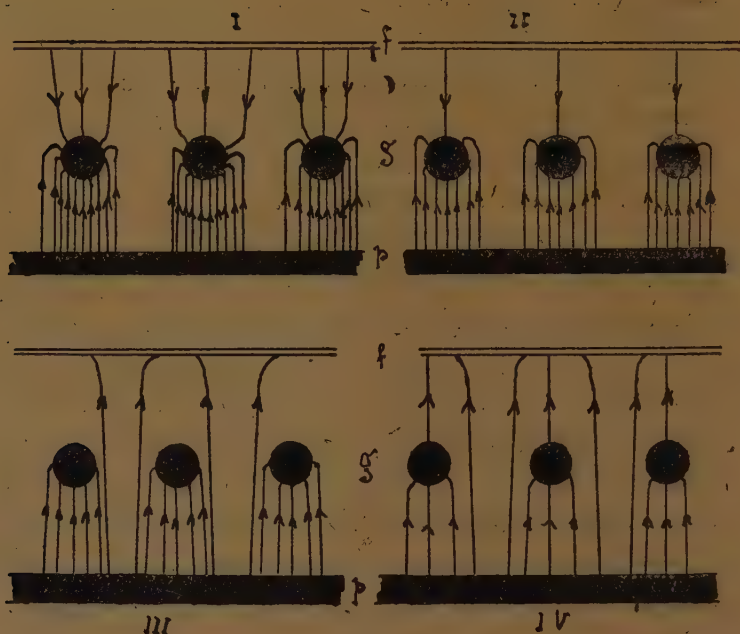


FIG. 4

Le schéma I répond à un potentiel de grille très inférieur à celui du filament — donc aussi de la plaque — on constate que les lignes de force, issues du filament et de la plaque, se terminent toutes à la grille.

Si l'on fait croître le potentiel de la grille, on constate, schéma II, qu'il arrive un instant (un peu avant qu'il n'atteigne celui du filament situé en face de la maille de la grille considérée) où des lignes de force passent directement de la plaque au filament, au travers des mailles de la grille, les électrons suivent ces lignes de force : le courant de plaque s'établit.

A l'égalité de potentiel du filament et de la grille (schéma III), les lignes de force entre la grille et le filament n'existent plus, elles réapparaissent à la moindre élévation du potentiel de la grille, dès lors il existe un courant de grille. En réalité, on sait que ce courant s'établit pour un potentiel légèrement inférieur à celui de l'extrémité du filament dont le potentiel est le plus bas, pour la raison qu'il existe dans l'atmosphère du filament des charges électroniques modifiant le champ répondant aux seules charges des électrodes. Il en résulte que le courant débute dès que les lignes de force venant de la grille se portent dans les charges d'électrons négatifs entourant le filament.

Enfin, le potentiel de la grille dépasse celui du filament, et le schéma IV montre l'augmentation du nombre des lignes de force entre la plaque et la grille vers le filament : ce qui traduit l'augmentation de l'intensité des courants de plaque et de grille.

Signalons, en outre, que le filament subit une chute ohmique de tension entre ses deux extrémités et que, par suite, il n'y a pas égalité des différences de potentiel qui existent entre les différents points du filament et la plaque de la grille ; lorsque le potentiel de la grille croît, c'est par les mailles de la grille situées à l'extrémité du filament répondant à la sortie du courant de chauffage que débute le passage des courants électroniques : plaque, grille, filament.

De tout ce qui précède, nous pouvons tirer cette conclusion que : la présence de la grille modifie le champ de force électrique entre le filament et la grille et que

l'importance et la nature de cette modification dépendent du potentiel propre auquel se trouve portée la grille.

En faisant varier ce potentiel, il est possible de changer l'intensité du champ au voisinage du filament et ceci entraîne, fatalement, des changements dans les trajectoires des électrons ; par suite, aussi, des variations du courant dans l'espace compris entre le filament et la plaque.

De plus, pour modifier le potentiel de grille, il suffit de mettre en jeu une force électromotrice infiniment petite, si bien que la lampe nous fournit le moyen de modifier l'intensité du courant d'une pile avec les plus infimes quantités d'énergie.

Donc, en conclusion :

« La lampe à trois électrodes est un relais amplificateur de courant qui est doué d'une sensibilité extraordinaire.

» Ce relai est aussi fidèle, car il ne comporte aucun organe mécanique : il est sans inertie et peut suivre toutes les variations de fréquence d'un courant quelconque.

» Il est, enfin, apériodique et contrôle exactement le courant que l'expérimentateur lui demande de déceler.

Et voici réunies toutes les qualités que nous avons reconnues à la corde galvanométrique d'Einthoven.

A ces avantages, se surajoute celui de pouvoir utiliser la propriété que possède la lampe triode d'amplifier le courant, aussi faible soit-il, reçu sur sa grille. Une série, judicieusement établie, de ces lampes doit, en effet, permettre d'atteindre un dernier courant dont la force électromotrice soit suffisante pour obtenir une inscription du courant étudié sur des appareils plus simples et beau-

coup moins coûteux que ne le sont ceux qui complètent, à cet usage, le galvanomètre d'Einthoven.

Ces diverses considérations entraînant notre conviction qu'il pouvait être avantageux d'utiliser la lampe triode au lieu et place de la corde d'Einthoven, nous en venions, tout naturellement, à imaginer quel serait le montage le plus adéquat à l'application que nous envisagions, à savoir : la captation et l'amplification du courant cardiaque, durant la contraction du myocarde.

Or, en examinant le tracé de l'électrocardiogramme, nous observions qu'il affectait, *grosso modo*, la forme d'une courbe d'oscillations présentant des ondulations réparties de part et d'autre d'un axe horizontal ; — *priori*, cette disposition aiguille, naturellement, l'esprit, vers l'idée d'une alternance. Mais ce courant doit-il être traité comme de l'alternatif ou du continu variable ?

Remarquons, en passant que, si l'on veut bien aller au fond des choses, la distinction n'est pas si tranchée, que ces deux termes semblerait l'indiquer, entre la nature des courants que l'usage fait ainsi dénommer. Rien n'est-il, en effet, de plus aisé que de passer du courant continu à un courant d'apparence vibratoire ou alternatif ? Il suffit de songer au trembleur ou à la bobine de Ruhmkorff.

Si, d'autre part, nous sommes en présence d'un courant alternatif, dont les oscillations se répartissent de part et d'autre de l'axe horizontal de coordonnées, surajoutons-lui un courant continu, qui permette de relever les ondulations négatives au-dessus de l'axe de coordo-

nées et l'ensemble prend l'allure d'un courant continu variable.

Pour faire un choix entre les procédés connus permettant de capter et d'amplifier les courants présentant une alternance à fréquence très basse, puisque le battement du myocarde se fait à la cadence de 70, en moyenne, par minute, nous avons, tout d'abord, songé aux deux dispositifs préconisés par MM. H. Abraham et E. Bloch et indiqués par eux dans l'étude dont l'Académie des Sciences donnait le 30 juin 1919, le compte rendu.

« 1° Si le circuit de plaque d'une lampe renferme une résistance comparable à celle de la plaque (50.000 ohms environ), une variation de potentiel de la grille entraîne une variation de courant dans la plaque et, par suite, un changement de potentiel de celle-ci. On peut transmettre directement ce changement à la grille d'une autre lampe à condition d'intercaler sur le fil de communication une batterie de piles (ou accumulateurs) auxiliaires, qui ramène le potentiel de cette grille au point de fonctionnement le plus favorable. En répétant cette liaison par piles ou accus entre les lampes successives d'un amplificateur à résistance, on réalise un amplificateur capable de fonctionner pour toutes les fréquences et, en particulier, pour les fréquences les plus basses et le courant continu.

Comme le voltage de la batterie de liaison entre deux lampes ne peut varier que par échellons discontinus (de deux volts, s'il s'agit d'accumulateurs) un peu trop grands pour régler, avec précision, le potentiel de la grille, il est bon d'intercaler en série entre chaque résis-

tance de plaque une petite résistance variable qui permet un réglage parfait du potentiel de la grille considérée.

» 2° On peut, également, établir la liaison entre les lampes successives d'un amplificateur à résistance par des capacités de 1-2 microfarads. On donne ainsi à l'amplificateur dont les grilles sont, comme toujours, munies de résistances de décharge de quelques mégohms, une très grande constance de temps, pouvant atteindre plusieurs secondes, d'où l'inconvénient d'une mise en régime relativement lente, mais l'appareil amplifie des courants de fréquence inférieure aux constantes de temps. L'expérience montre qu'il y a avantage à shunter les résistances de plaque par des capacités assez élevées (0.25 microfarads, environ), afin d'éviter les réactions de l'amplificateur de très basse fréquence sur les amplificateurs de basse fréquence qui le précèdent ».

De ces deux dispositifs, il nous a paru que le premier semblait s'appliquer très exactement au problème que nous envisageons ; à savoir :

« Dans un circuit, circule un courant d'intensité très faible et variant périodiquement à la fréquence de 70 oscillations par minute environ, obtenir, dans un second circuit, parcouru par un courant continu, des changements d'intensité proportionnels mais très amplifiés ».

Et voici, rapidement, la description du montage que nous avons réalisé (suivre fig. V).

Sur une ligne LL', qui devait être réunie, par l'intermédiaire d'électrodes impolarisables, aux dérivations DI, DII et DIII utilisées en électrocardiographie, et

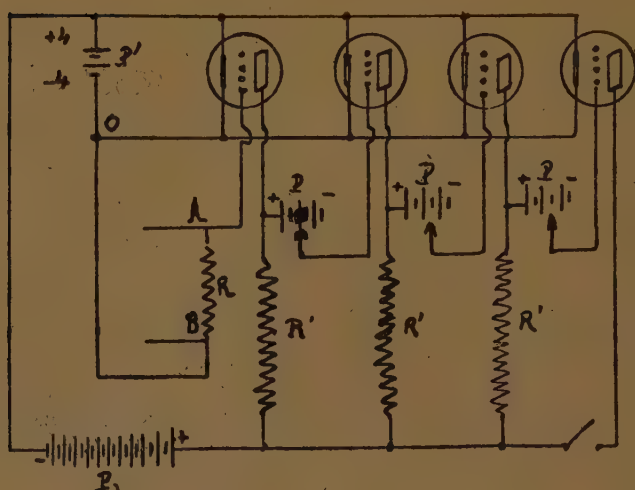


FIG. 5

parcourue, de ce fait, par un courant très faible, dont l'intensité change, à certains instants, de valeur avec une périodicité quelconque, on intercale, tout d'abord, une résistance (R) puis on fait aboutir cette ligne à la grille d'une lampe triode. La valeur de cette résistance (R) est choisie de façon à obtenir la plus grande chute ohmique possible pour les conditions du circuit parcouru par le courant à amplifier.

A l'instant d'un changement d'intensité, la tension de grille de la lampe varie et provoque une variation d'intensité du courant dans le circuit de plaque sur lequel

sont intercalées une pile (P) et une résistance (R'), de 80.000 ohms, on obtient ainsi, entre les points A' et B', une variation de la différence de potentiel plus élevée que celle qui se produisait entre les points A et B d'arrivée du courant. Comme il s'agit de transmettre à la grille de la seconde lampe amplificatrice une tension continue variable, on emploie une batterie de liaison, piles P, qui est destinée à ramener le potentiel de la grille de cette seconde lampe à une valeur convenable, c'est-à-dire très voisine de celui du point commun (O).

Par suite de la chute ohmique de tension le long de la résistance (R'), lors du passage du courant de plaque, le potentiel en A', est inférieur à celui du point O, il est donc nécessaire de le relever, et cette manœuvre se fait en reliant la grille de la seconde lampe amplificatrice à un point convenablement choisi de la batterie de pile intermédiaire (P), et comme cette batterie est composée d'éléments séparés les uns des autres par une différence de potentiel de deux volts environ, on ajoute à l'ensemble un petit potentiomètre qui permet de prendre tous les intermédiaires de réglage sur les deux volts d'échelon.

Les variations de potentiel de la seconde lampe, produites par la chute de tension le long de la résistance (R') produisent, dans le circuit de plaque de cette lampe des variations d'intensité du courant ; sur ce circuit on pourrait disposer l'appareil récepteur, milliampèremètre ou galvanomètre enregistreur, mais pour obtenir une amplification plus considérable, on utilise de nouveaux

étages, disposés exactement de la façon qui vient d'être décrite.

La pile (P_1), de 80 volts, est commune à tous les circuits de plaque, les piles (P) de liaison, montées en série avec des potentiomètres, servent à rétablir l'égalité du potentiel des grilles successives avec celui du point (O).

Si l'on abaisse suffisamment le potentiel de la grille de la dernière lampe, on arrive à annuler le courant de plaque et faire en sorte qu'il ne prenne naissance qu'à l'instant où un courant passe dans le circuit dont on veut amplifier le courant.

Sur ce montage, nous avons établi un poste à 4 lampes, et comme chacune d'elle donne une amplification d'environ 10 fois la valeur du courant reçu — théoriquement, du moins — nous faisons passer de 10^{-8} à 10^{-4} ampères l'intensité du courant connecté sur la première de ces lampes, et ce courant pouvait être reçu sur un milliampèremètre suffisamment sensible.

La résistance d'entrée, placée entre les points A et B et un potentiomètre, placé en série, permettaient d'annuler le courant de peau comme dans la manœuvre de l'électromètre à corde.

Ceci dit, qu'avons-nous obtenu en connectant, par les moyens ordinaires sur les dérivations de l'électrocardiogramme ?

Les résultats suivants :

Nous eûmes, tout d'abord, ce que nous appellerons des essais de mise au point de notre appareil, primitivement monté avec trois lampes triodes. Ces premiers essais

nous permettaient d'obtenir sur notre milliampèremètre de toutes petites oscillations, d'une demi-division environ, mais il était impossible d'en suivre le rythme exact et d'affirmer que leur cadence se synchronisait avec celle du battement cardiaque.

Peu à peu, avec un meilleur réglage, nous parvenions à amplifier légèrement ces oscillations, qui nous paraissaient prendre des périodes tantôt équivalentes à celles du battement cardiaque, tantôt plus rapides ou plus lentes, et cependant il semblait que, dans ces derniers cas, les battements de l'aiguille étaient multiples exacts, généralement doubles, ou sous-multiples de ceux du myocarde. Comme dans nos tout premiers essais, l'aiguille était animée d'oscillations irrégulières parasites qui troublaient sérieusement notre observation, et nous constations que ces mouvements de l'aiguille se produisaient même en dehors de toute connexion aux électrodes reliant l'appareil au sujet en expérience.

Puis, au hasard des expériences, il est advenu, un jour, que nous avons obtenu un résultat tout différent, tranchant nettement sur tout ce que nous avions observé jusqu'alors.

L'aiguille de l'ampèremètre se trouvait, en effet, soumise à un battement très caractéristique dont l'amplitude atteignait, environ, une quinzaine de divisions.

Ces battements, à l'examen, présentaient des accidents constitués par de petites oscillations secondaires, se greffant sur le grand mouvement de va et vient de l'aiguille, et le plus important de ces ressauts se produisait au retour de l'aiguille vers la position zéro.

La cadence de ces oscillations était exactement rythmée sur celle du battement cardiaque.

Diverses personnes, six en l'occurrence, ayant été placées dans le circuit, on observa que le milliampèremètre donnait des battements similaires, mais non identiques, l'amplitude et la fréquence changeait pour chaque individu.

Déjà cette expérience nous donnait les plus belles espérances, et nous imaginions pouvoir sans trop de difficultés inscrire le phénomène afin d'en confronter le tracé avec celui de l'électrocardiogramme, obtenu par la corde galvanométrique d'Einthoven. Notre espoir était grand de voir ces deux tracés sinon s'identifier absolument, tout au moins s'apparenter de telle sorte que notre démonstration aurait été parfaitement certaine.

Mais, hélas ! quoique cette expérience ait pu se poursuivre durant au moins deux heures sans que l'appareil se dérégât un instant, et bien que depuis lors, nous nous soyons efforcés de retrouver un même réglage et cela à maintes reprises, il ne nous a pas été donné de reproduire exactement les mêmes conditions et, par suite, d'obtenir une seconde fois des battements d'une telle amplitude.

Pour essayer d'augmenter la sensibilité, nous adjûgnîmes une quatrième lampe à l'ensemble, sans obtenir d'autre résultat qu'une augmentation légère de l'amplitude des battements de l'aiguille du milliampèremètre et même aussi des parasites.

De tels résultats, dans l'ensemble véritablement négatifs, nous laissaient assez perplexe, car nous n'arrivions

pas à saisir la raison pour laquelle : un courant variable de quelques 10^{-8} ampères sous quelques millivolts, à la fréquence de 70 oscillations par minute environ, ne pouvait s'enregistrer convenablement, dans les conditions ci-dessus indiquées, puisque, véritablement, il paraissait, *à priori*, en tous points comparable en intensité et en potentiel à celui que tout amateur de T. S. F. est, aujourd'hui, capable de détecter sur des appareils autrement moins sensibles bien souvent, que ne l'était le nôtre ?

Et puis, et surtout, pourquoi le hasard avait-il fait que l'une de nos expériences nous ait donné le résultat si intéressant, que nous avons rapporté plus haut, et quelle pouvait être, ce jour-là, la faute de montage qui, vraisemblablement, nous avait permis d'amplifier d'une façon si satisfaisante, et à l'abri des parasites habituels, le courant que nous nous efforcions d'inventorier par ce moyen ?

Nous en étions arrivés à ce point de nos recherches, lorsque nous fûmes mis en relation avec M. Bull, Sous-directeur de l'Institut Marey, qui, d'une manière tout à fait remarquable — entre autres travaux scientifiques de la plus haute valeur — a mis au point un appareil d'électrocardiographie, sur le principe de la corde d'Einthoven, qui est, précisément, celui même que construisent, en France, les Etablissements Bouillite.

Dans un entretien particulier, avec la plus grande bienveillance, M. Bull voulut bien nous apprendre plusieurs choses que nous avions ignorées jusque-là... Entre autres, que lui aussi, s'était déjà, en collaboration avec M. Abraham, préoccupé de ce même problème. Ils

avaient utilisé, pour ce faire, le second procédé de montage, c'est-à-dire celui dans lequel les liaisons entre les grilles se font à l'aide de capacité de quelques microfarads... Ils avaient obtenu des résultats presque en tous points comparables à ceux que nous-mêmes avions obtenus, à l'exception de celui tout particulier dont nous avons fait mention dans notre description.

M. Bull pensait que c'était surtout des parasites atmosphériques ou dus aux émissions radiotélégraphiques qui devaient être la cause des oscillations irrégulières gênant si fort les expériences, à moins que ce ne fut tout simplement des décharges de pile, des désamorçages de lampe, des court-circuits dans les capacités, etc...

Enfin, M. Bull m'apprit encore, que depuis quelques mois, les Américains avaient repris le même problème et annoncé sa solution, mais, ajoutait-il, il n'avait pu obtenir, bien qu'il les ait demandées directement lui-même, des précisions sur les résultats obtenus par les Américains.

Tout ceci était, certes, fort intéressant, mais ne nous donnait pas l'explication du fait — dont notre souvenir ne pouvait se détacher — qu'il était arrivé un jour que les résultats obtenus avaient été tout à fait satisfaisants.

Dans cet état d'esprit, nous rencontrons un ami, M. Rio, cerveau très curieux, avide de recherches scientifiques, ingénieur distingué qui depuis longtemps déjà s'est acharné à résoudre ce problème — plus délicat qu'il ne paraît de prime abord — de l'amplification des courants de très faible intensité tels ceux qui prennent naissance

dans les cellules de sélénium ou des piles thermo-électriques.

Bien vite, il sut nous faire comprendre la raison pour laquelle au milieu d'échecs successifs, nous étions parvenus un jour à obtenir des résultats favorables.

Supposez, nous dit-il, qu'il se soit produit dans une de vos lampes des oscillations locales et que celles-ci, en interférant avec le courant variable venant du myocarde, aient donné lieu à une onde de battement résultante : enfin, que cette onde se soit amplifiée sur les dernières lampes et voilà, sur votre millampèremètre les larges oscillations que vous avez pu observer.

Ou encore, autrement dit, est-ce que des vibrations d'ordre local inhérentes à des réactions de lampes, aux capacités, etc..., n'auraient pas pu donner une nouvelle forme au courant initial, venant du myocarde, et que sous cette nouvelle forme, celui-ci soit devenu beaucoup plus apte à recevoir l'amplification du reste de votre montage ?

C'était, certes, là une explication des plus plausibles, et, connaissant les recherches déjà faites par M. Rio en ce sens, nous ne doutions pas un seul instant de la valeur de son argumentation.

Il est vrai, qu'en T. S. F. (amateur et professionnel) partant de courants extrêmement faibles, tels ceux qui prennent naissance dans un cadre ou une antenne, impressionnés parfois à des milliers de kilomètres, par un poste d'émission, placé à ces distances, on arrive à détecter puis à amplifier ces courants de telle façon que l'on parvient, sans peine, à faire vibrer très fortement la

lame d'un haut parleur : ce qui suppose l'obtention de variations de courant de l'ordre de quelques $1/10$, au moins, de milliampères.

Mais, si l'on examine dans chaque cas, la forme du courant reçu dans le circuit récepteur, on s'aperçoit que l'on a toujours affaire à un courant variable périodiquement, et même quelquefois sinusoïdal, dont « *la fréquence la moins élevée est, au moins, de l'ordre des vibrations musicales* » (sur le courant détecté). En outre, les amplificateurs qui présentent les plus grandes sensibilités sont ceux dans lesquels les courants à amplifier sont des de haute fréquence et comportent des régimes variables de l'ordre de 100.000 à un million de périodes-secondes.

Tout naturellement, il était donc logique de songer à transformer le courant continu variable à pulsation très lentes (comme le courant du myocarde, par exemple), en un courant pulsatoire d'une fréquence assez élevée afin que les dispositifs classiques des amplificateurs de T. S. F. puissent devenir applicables au cas considéré.

« LA, ÉTAIT LA CLEF DU PROBLÈME ENVISAGÉ »

De ce point de vue, on imagine, étant donné un courant continu variable à régime très lent, de le découper (nous allons dire : de le hacher) par un courant d'une fréquence déterminée et d'appliquer ce courant résultant à régime périodique élevé, sur la grille d'une première lampe amplificatrice appropriée.

On peut, par exemple, donner au courant variable un découpage à fréquence musicale (en employant pour cela

certaines précautions, cependant), puis connecter ce nouveau courant de fréquence musicale à régime variable à un amplificateur à basse fréquence (à transformateur, si l'on veut), et l'on voit immédiatement le courant primordial amplifié dans de bonnes conditions avec un appareillage stable, simple, ne nécessitant aucun réglage, enfin, peu coûteux.

Etant donné ce principe, on peut se demander quelle est la meilleure forme et la meilleure fréquence à employer pour opérer ce découpage ?

Le principe général est qu'il vaut toujours mieux utiliser une fréquence très différente de celle du régime variable du courant à analyser et à amplifier.

D'autre part, si ce courant a une valeur déjà assez grande, de l'ordre de quelques micro-ampères, par exemple, on peut choisir comme système amplificateur, le montage de basse fréquence (à transformateur), comme étant le modèle le plus stable et l'on donnera la fréquence de découpage convenable au moyen soit d'un ticker ordinaire, soit d'une lampe triode montée en valve interruptrice sur le courant à amplifier.

Il est facile de voir que, dans le cas où l'organe découpant le courant primitif est la lampe triode, on peut, en appliquant sur sa grille un courant de fréquence déterminée, être maître de la fréquence de découpage du courant à analyser, on peut, donc, au besoin, donner à cette fréquence de découpage un ordre de grandeur comparable à ceux utilisés en radiotéléphonie ou radiotélégraphie : ceci permet de faire usage des amplificateurs à très haute sensibilité utilisés ordinairement dans cette application.

Si les caractéristiques de l'amplificateur à employer sont telles que l'on soit obligé de donner au courant à amplifier une forme se rapprochant de la forme sinusoïdale, on peut utiliser un petit commutateur tournant (entraîné par un moteur électrique), aux bornes duquel est appliqué le courant à analyser — continu variable, ou continu simple — qui sera, par suite, transformé très simplement en un courant sinusoïdal d'une fréquence choisie à volonté (par un simple réglage de la vitesse de rotation du commutateur).

Bref, de toute façon, on a traité le courant continu variable à analyser comme un courant de réception radio-télégraphique ou radiotéléphonique ordinaire, après lui avoir communiqué la forme qu'il présente au niveau des antennes ou des cadres de réception, ou la forme qu'il a après détection (celle d'un courant continu pulsatoire).

De ce fait, nous bénéficions, du même coup, des facultés que possèdent les lampes triodes de présenter de grands pouvoirs amplificateurs en suivant un montage classique connu.

En opérant ainsi, nous nous trouvons, tout naturellement, en possession, au niveau de la plaque de la dernière lampe, d'un courant à régime variable, reproduisant très fidèlement l'image du courant primitif, mais y ajoutant, par surcroît, une amplification considérable.

Un obstacle, cependant, semble, alors, se présenter, pour empêcher une utilisation immédiate de ce courant issu du circuit plaque de la dernière lampe ; en effet, même quand le système est à l'état de repos, il circule dans ce circuit, un courant notable pouvant atteindre

plusieurs milliampères : c'est le courant filament-plaque. Et ce courant, à régime constant, se superpose à notre courant à régime variable : ce fait rend plus délicates à réaliser les méthodes d'analyse, de mesure et d'enregistrement.

C'est pourquoi, M. Rio a imaginé un dispositif de montage en pont de Weastone, très particulièrement judicieux, grâce auquel ce ne sont plus les variations de régime du circuit-plaque que l'on cherche à apprécier, mais bien les variations de résistance de l'espace compris entre la plaque et le filament.

Dans ce montage, qui appartient en propre à M. Rio, le galvanomètre ou l'appareil d'analyse du courant, au lieu d'être branché, comme il est classique de le faire, sur la branche diagonale du pont de Wheastone, est remplacé, en ce point, par une lampe à trois électrodes dont la grille et le filament reçoivent les variations de potentiel provenant des variations d'équilibre du pont.

Il est donc facile de comprendre que, grâce aux deux dispositifs décrits, le courant primitif à analyser, continu ou continu à régime variable, déterminera dans la dernière lampe amplificatrice un régime variable d'une façon symétrique au courant primitif, mais avec une amplification considérable : cela aura pour résultat de donner, à chaque instant, des valeurs plus ou moins grandes de la résistance plaque-filament et tout ceci se traduira par des variations de potentiel, toujours symétriques, sur la grille de la lampe à trois électrodes intercalée sur la branche diagonale du pont.

Or si l'on parvient à régler, d'une façon convenable, les résistances de compensation de ce pont, on pourra trouver un régime d'équilibre qui correspondra exactement au zéro expérimental de l'appareil enregistreur connecté à la suite et qui inscrira son tracé au-dessus de ce zéro expérimental, avec, comme axe des abscisses la représentation du courant correspondant à l'équilibre du pont (potentiel zéro à la grille de la triode).

Enfin, au cas où n'aurions pas obtenu encore une amplification suffisante, rien n'empêche de recommencer la même opération, de partir de ce nouveau courant plaque-filament amplifié, pour le découper de nouveau, comme il a été fait précédemment, puis de le réamplifier de la même manière.

Et nous pouvons faire remarquer que, par le fait qu'il n'existe aucun point commun ni électromagnétique, ni électrostatique entre les deux systèmes, il n'y a aucune crainte à avoir qu'il se produise des réactions d'accrochage entre les divers étages successifs d'amplification qu'il peut être nécessaire d'établir.

Enfin, comme résultat final, nous obtiendrons un courant absolument semblable dans ses variations au courant primitif à analyser, mais que notre méthode d'amplification aura fait passer de quelques 10^{-8} ampères à un courant de plusieurs milliampères.

Par suite, nous possédons le moyen d'utiliser pour l'enregistrement de tels courants des dispositifs connus — tels des oscillographes — beaucoup plus rustiques et robustes que ne le sont les éléments d'amplification que la corde galvanométrique exigeait pour l'enregistrement

de sa vibration. Les dispositifs, que nous pourrions employer dans le cas présent, se trouvent déjà dans les applications industrielles courantes, leur réglage est des plus simple ; enfin, leur prix de revient prend une allure des plus modestes si on le compare à ceux de l'électrocardiographe.

En un mot, notre instrument pourrait prendre sa place dans le cabinet de consultation de tout praticien et si les résultats de nos premières expériences s'affirmaient nettement, constituer pour lui une aide précieuse pour l'examen clinique de ses cardiaques, et peut-être aussi de ses autres malades.

Pour terminer cette étude, examinons comment nous réalisons le montage définitif de l'appareil :

Le courant du myocarde, dans ses dérivations D I, D II, D III, est recueilli, par les moyens ordinaires, c'est-à-dire à l'aide d'électrodes impolarisable (soit cuves, soit bracelets), puis amené aux bornes de l'appareil, après avoir traversé une résistance fixe.

Aux bornes, également, est connecté le circuit de compensation du courant de peau, représenté — comme dans le cas de l'électrocardiographe — par une source électrique (pile ou accumulateur), une résistance fixe de 20 ohms, et une résistance variable de 1 ohm.

Le courant est amené au découpage sur un ticker (ou autre moyen) lui-même vibrant à fréquence musicale sous l'influence d'une excitation par une hétérodyne à basse fréquence.

Le courant, une fois découpé, est connecté sur un am-

plificateur à transformateur, présentant trois étages de lampes triodes.

Le circuit de plaque de la troisième lampe amplificatrice est dirigé sur le circuit filament grille d'une triode placée dans la diagonale d'un pont de Wheastone, afin d'annuler la perturbation apportée par la présence du courant filament-plaque de la dernière triode amplificatrice, les résistances variables placées dans les branches du pont de Wheastone permettant de régler exactement le zéro *expérimental* de l'appareil enregistreur.

Avant de placer à ces lignes le point final, nous nous permettrons d'exprimer notre espoir eu un couronnement pratique de notre recherche.

Pour toutes les considérations, et aussi, pour les réalisations pratiques de toute nature que le dispositif indiqué nous donne la possibilité d'entrevoir pour l'avenir, il nous semble que ce moyen, nouveau, que nous avons le très grand honneur de proposer, en ce jour, peut trouver une place honorable dans l'arsenal des méthodes d'investigation que physiologistes et cliniciens ont aujourd'hui à leur disposition.

Et, si cette éventualité se réalisait, selon nos vœux, nous serions tout heureux d'avoir pu ajouter notre modeste pierre au majestueux édifice qui s'élève sous l'effort laborieux de chacun et qui, sur son fronton, porte le devise « *Science et Vérité* ».

Conclusion

L'étude critique, que nous venons de faire dans les pages précédentes, nous permet de conclure ainsi :

Il semble possible d'obtenir une captation, puis une amplification, enfin un enregistrement des phénomènes électriques accompagnant les contractions musculaires, en général, et du myocarde, en particulier (constitués par de très faibles variations de potentiel sur une très basse fréquence, en faisant usage des propriétés remarquables de la lampe triode (lampe à 3 électrodes).

Pour parvenir à ce résultat, il convient d'adopter un dispositif spécial s'écartant nettement de ceux, qui paraissent classiques, utilisés jusqu'ici pour amplifier les courants continus variables à très basse fréquence (méthode Abraham, par exemple).

Le principe, qui donne les résultats les plus satisfaisants, repose sur le découpage préalable du courant continu variable à très basse fréquence à analyser, par un courant vibratoire (ou sinusoïdal), dont la fréquence est d'ordre musical, avant de procéder à l'amplification de ce courant par le moyen d'un amplificateur à basse fréquence, à transformateur, du modèle ordinaire.

Enfin, avant d'adresser le courant, amplifié de cette manière, à un enregistreur, il convient de le balancer sur le circuit filament-grille d'une dernière lampe triode, montée sur la diagonale d'un pont de Wheastone, ce qui permet de supprimer l'obstacle à un enregistrement facile, constitué par le courant filament-plaque de la dernière lampe triode de l'amplificateur.

L'utilisation de la lampe triode permet, ainsi, de réaliser un montage simple, très robuste et peu coûteux d'un appareil paraissant tout particulièrement adapté à la captation des très faibles courants électriques, tels en ce qui nous concerne : ceux qui accompagnent la contraction du myocarde, d'amplifier, enfin, les dits courants de façon telle qu'il n'est plus nécessaire de recourir à des enregistreurs extra-sensibles, délicats et coûteux pour obtenir un tracé électrocardiographique convenable.

Vu, le Doyen,

ROGER.

Vu, le Président,

BRINDEAU.

Le Recteur de l'Académie de Paris,

Vu et permis d'imprimer :

APPELL.

Bibliographie

YACOËL. — L'électrocardiographie et ses applications cliniques. — *J. Méd. Paris*, 1922.

— De l'importance de l'électrocardiographie dans la clinique cardiologique. — *Pratique Médic. française*, Paris 1921-22.

DE MEYER. — Les méthodes modernes d'examen du cœur et des vaisseaux.

GRIPEKOVEN. — L'examen du cœur au moyen de l'électrocardiographie. — *An. Chirurg.*, Bruxelles 1922.

ANDRÉ STROHL. — La conductibilité électrique du corps humain.

PHILIPPSON. — Application des lampes à 3 électrodes à la mesure de la résistance électrique des cellules et des tissus vivants. — *Arch. int. Physiol.*, 1921.

G. VALLAURIE. — Fonctionnement de tubes à vide à 3 électrodes. — *Electrotecnica*, 1917.

W.-H. ECCLES. — Etude des actions internes d'une lampe à 3 électrodes. — *Radio review*, 1919.

G. GUTTON. — La lampe valve à 3 électrodes. — *Revue Générale d'Electricité*, 1919.

Ch. FORTESCUE. — La lampe à 3 électrodes. — *R. R.* 1919.

LEE. de FOREST. — L'audion. — Son fonctionnement et quelques-unes de ses applications récentes. — *Journ. of Franklin Institut.*, 1920.

ABRAHAM et BLOCH. — Amplificateur pour courant continu et pour courant de très basse fréquence. — *C. R. Acad. Sciences*, 1915.

Michel ADAM. — Construction des amplificateurs à basse fréquence. — *R° électr.*, 1922.

E.-V.-L. APPLETON. — Effet du courant filament grille. — *Phil. Mag.* 1919.

M. ADAM. — Les amplificateurs à transformateurs. — *Radio-électricité*, 1921.

BERKHAUSEN. — L'amplification des faibles courants alternatifs. — *Rad. Rev.*, 1922.

SCHOTTKY. — Sur les amplificateurs à vide. — *Archiv. für Electr.*, 1919.

A. BLONDEL. — Emploi des amplificateurs à la mesure des potentiels faibles. — *R. S. E.*, 1919.

R. DEPRIESTER. — Emploi des amplificateurs à la mesure des différences de potentiel faibles. — *R. S. E.*, 1919.

H. ABRAHAM, E. BLOCH. — Appareils sensibles pour la mesure des courants alternatifs. — *C. R. Ac. sc.*, 1919.

H. ABRAHAM. — Utilisation des lampes amplificatrices pour les mesures électriques. — *Ann. XVI*, 1920.

H. ABRAHAM, E. BLOCH. — Amplificateur de très basse fréquence et oscillographe à plume. — *R. S. E.*, 1920.

H. ABRAHAM. — Application des amplificateurs à l'inscription graphique. — *C. R. Ac. sc.*, 1919.

MALASSEZ. — Emploi de la lampe à trois électrodes pour la mesure des courants d'ionisation. — *C. R. Ac. Sc.*, 1921.

